

海洋酸性化による音波伝搬損失への影響*

○土屋利雄(海洋研究開発機構、東京海洋大), 服部岳人(東京海洋大)

1. はじめに

海水中の音波の伝搬における吸収損失量は、pH(水素イオン濃度)の値によって変化することが知られている。近年、大気中の CO_2 濃度が増加し、海水中に多く溶け込むようになったため、酸性化(pH が減少)が急速に進行し、特に低周波における吸収損失 α が減少することが予想¹⁾されている。我々は、寒冷海域から熱帯海域までの pH の変化による伝搬減衰を計算し、現在から今世紀末までの長距離音波伝搬における影響を調査した。

2. 海水酸性化と音波吸収損失

2.1 海水酸性化のメカニズム

産業革命以降、 (CO_2) 二酸化炭素が増え続けており、大気に放出された二酸化炭素の約半分は海洋に吸収され、海水の酸性化が進んでいる²⁾。

CO_2 は海水に溶けると、



水素イオン(H^+)を放出する弱酸として振る舞う。

ここで、 HCO_3^- は重炭酸イオン、 CO_3^{2-} は炭酸イオンである。したがって、弱酸である二酸化炭素が海水中に溶け、pH が低下する。海水の pH 値は、現在ほぼ 8.1(弱アルカリ)であるが、海中にとけ込む CO_2 の量が増えると結果として海水が少しずつ酸性化してくる。IPCC(政府間パネル)の第三次報告書での報告された値で平衡状態になると、Fig.1 のように今世紀末までに海洋の pH の値は 0.3 ほど

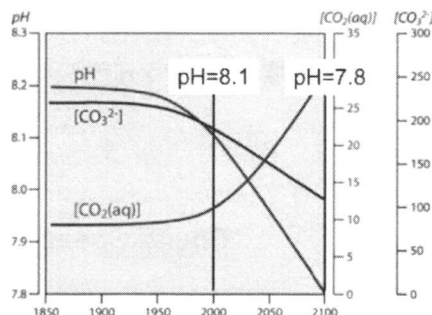


Fig.1 大気中の CO_2 [$\text{CO}_2(\text{aq})$] と海中の炭酸イオン [CO_3^{2-}] と pH の関係

(Scott Doney, Wood Hole 海洋研究所)

上昇すると報告されており、石灰質の殻を持つ小型の貝(カイアシ類)などの生育に深刻な影響を与えると懸念されている。

一方、海水の pH 値は、音波の吸収損失 α に影響を与えることが知られており、pH の低下により音波の伝搬損失が小さくなり、潜水艦の探知や海中音波を利用する海洋哺乳類への影響も懸念されている。pH の変化は、低周波音波(10kHz 以下)の吸収損失の主要原因であるホウ酸 $\text{B}(\text{OH})$ の緩和作用に影響を与えたと考えられている。

pH と吸収損失の関係を表した式は、①Schulkin & Marsh³⁾, ②Francois & Garrison^{4),5)} 及び③Ainslie & McColm⁶⁾の各式が知られている。最近では、 α (dB/km)は、(1)式において、ホウ酸の寄与(第1項)と硫酸マグネシウムの寄与(第2項)と真水の寄与(第3項)の合成として表される。

$$\alpha = \frac{A_1 P_1 f_1 f^2}{f^2 + f_1^2} + \frac{A_2 P_2 f_2 f^2}{f^2 + f_2^2} + A_3 P_3 f^2 \quad [\text{dB/km}]$$

... 1

各式によって各々係数は、異なるが、ここでは、よく使われている Francois & Garrison の式における各係数を示す。

1)式の第1項、は、ホウ酸の寄与を示す項であり、 A_1 、 P_1 、 f_1 は、それぞれ次のように表される。

$$A_1 = \frac{8.86}{c} \times 10^{(0.78 \text{ pH} - 5)} \quad [\text{dB} / (\text{km} \cdot \text{kHz})]$$

$$P_1 = 1$$

$$f_1 = 2.8 \times \left(\frac{S}{35} \right)^{0.5} 10^{(4-124S/\theta)} \quad [\text{kHz}]$$

ここで、 f は、音響周波数[kHz]、 f_1 は、ホウ酸の緩和周波数を示す。

θ は、絶対温度($\theta = 273 + T[^\circ\text{C}]$)、 c は音速 $c = 1412 + 3.2 + 1.19S + 0.0167D$ [m/s]、 pH は、水素イオン濃度、 S は塩分濃度[‰]、 T は水温[°C]、 D は水深[m]である。

第2項は、硫酸マグネシウムの緩和周波数を示す。ここで、 A_2 、 P_2 、 f_2 は以下のように表される。

* Influence on sound absorption loss by the acidification of the ocean, Toshio Tsuchiya (JAMSTEC, Tokyo University of Marine Science and Technology), Gakuto Hattori (Tokyo University of Marine Science and Technology)

$$A_2 = 21.44 \frac{S}{c} (1 + 0.025T) \text{ [dB / (km} \cdot \text{kHz)]}$$

$$P_2 = 1 - 1.37 \times 10^{-4} D + 6.2 \times 10^{-9} D^2$$

$$f_2 = \frac{8.17 \times 10^{(8-1990/\theta)}}{1 + 0.0018(S-35)} \text{ [kHz]}$$

第3項は、真水の寄与をあらわし、 A_3 、 P_3 、 f_3 は、以下のように表される。

$$A_3 = 4.973 \times 10^{-4} - 1.146 \times 10^{-5} T + 9.11 \times 10^{-7} T^2 - 1.50 \times 10^{-8} T^3 \text{ [dB / (km} \cdot \text{kHz)]}$$

$$P_3 = 1 - 3.83 \times 10^{-5} D + 4.9 \times 10^{-10} D^2$$

ただし、この式の有効範囲は、周波数 10Hz ~ 500kHz において、 $-2 < T < 22$ (°C), $30 < S < 35$ (‰), $0 < D < 3.5$ km である。ただし、1)式は、それぞれのパラメータは各々関連していることから単純にその影響を論じることにはできない。

本報告では、様々な緯度の海域における水温と塩分の実測値を用いて、現在の pH 値 (8.1) と今世紀末の予測値 (7.8) を用いて α を計算し、比較検討した。

3. 調査海域

調査海域は、ほぼ同時期で同じ経度で緯度の異なる海域として、JASMTEC の調査船「みらい」の 2007 年 10 月 ~ 11 月にかけて行った調査航海のデータ⁹⁾を使った。

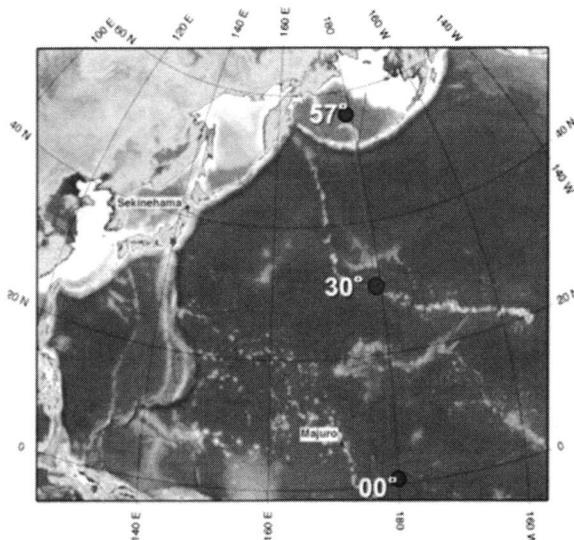


Fig. 2 観測海域図

ここでは、高緯度海域(北緯 57° 付近)中緯度海域(北緯 30° 付近)低緯度海域(赤道 0° 付近)の深度方向の水温・塩分のデータを使用した。データは校正後、水温については、 ± 0.01 °C 以下の精度が保証されている。

Fig.3-4 に各緯度海域における深度方向の水温と塩分および UNESCO の式を用いて計算した音速プロファイルを示す。これらの図から、高緯度海域における浅海域で水温、塩分、音速の値が小さいことが見て取れる。

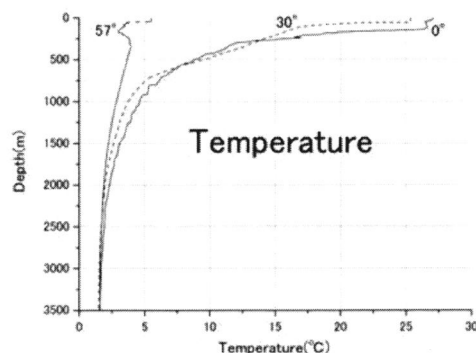


Fig. 3 水温プロファイル

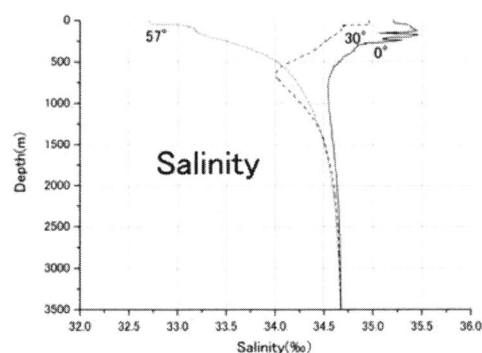


Fig. 4 塩分プロファイル

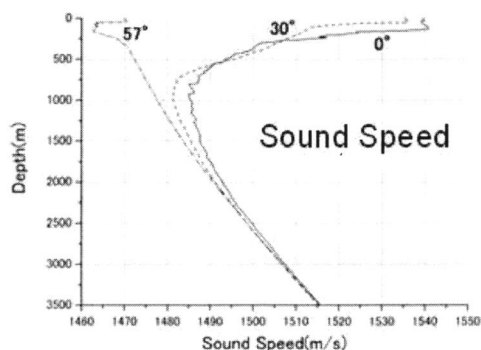


Fig. 5 音速プロファイル (UNESCO の式)

4. 計算結果

4.1 各緯度における $\Delta \alpha$ の比較

Francois & Garrison の式(1式)に深度方向の水温・塩分プロファイル (Fig.3,4) を入力し、水深 1m ごとの α を深度 3500[m] まで計算した。この際、pH 値として、Fig.1 のように西暦 2000 年の値 pH=8.1 と 2100 年の値 pH=7.8 それぞれについて、 α を求め、深度に対する変化を比較した。計算周波数は、シロナガス鯨の通信周波数¹⁰⁾とされる 22[Hz]、ミンク鯨の 100[Hz]、海洋音響トモグラフィ観測の代表的な周波数 400[Hz]、低周波ソーナーの 1[kHz]、サブボトムプロファイラ¹¹⁾の 3.5[kHz]である。計算は、<http://www.tsuchiya2.org>⁸⁾を利用し、計算結果のグラフを作成した。Fig.6-10 に計算結果を示す。

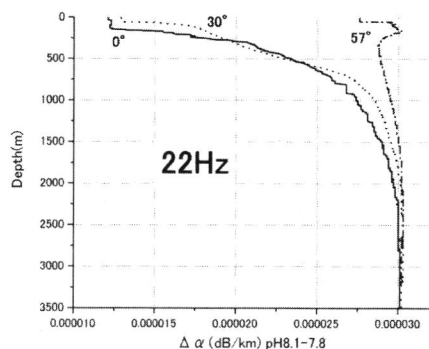


Fig. 6 各緯度での深度と $\Delta \alpha$ (22[Hz])

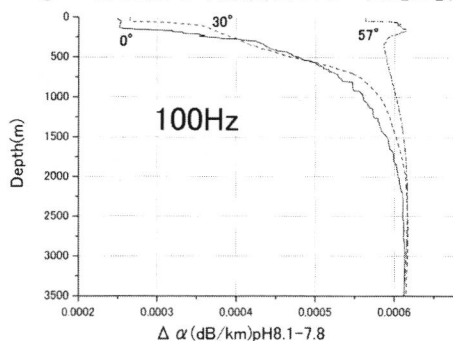


Fig. 7 各緯度での深度と $\Delta \alpha$ (100[Hz])

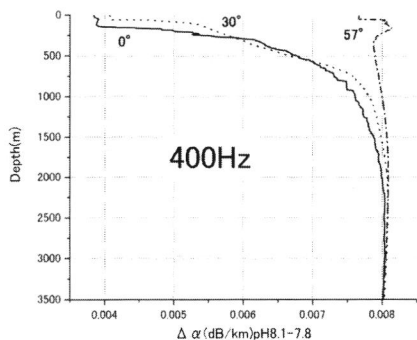


Fig. 8 各緯度での深度と $\Delta \alpha$ (400[Hz])

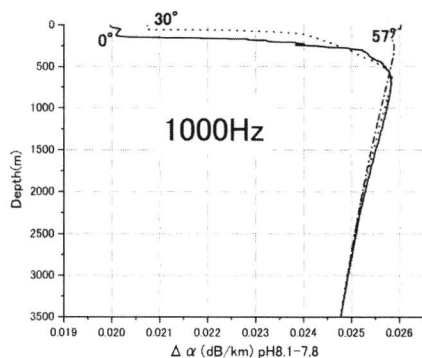


Fig. 9 各緯度での深度と $\Delta \alpha$ (1000[Hz])

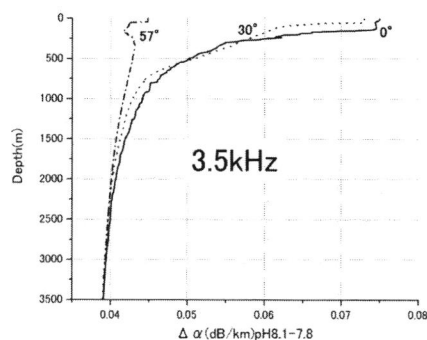


Fig. 10 各緯度での深度と $\Delta \alpha$ (3.5[kHz])

これらの図では、各々の海域での西暦 2000 年 (pH=8.1) と 2100 年 (pH=7.8) における α (dB/km) の差とを $\Delta \alpha$ として、各緯度ごとに表している。

Fig.6-8 では、いずれの海域でも 2100 年には、吸収損失が減少し、深度が大きくなるほど吸収損失の差が大きくなっていく傾向がみられる。浅海域 (500[m] 以浅) では、高緯度海域における $\Delta \alpha$ が中緯度・高緯度海域に比べ大きくなっている。これは、式 1) の係数 A_1 から pH による影響は、音速 c が小さいほど大きくなるが、音速は、水温と塩分濃度が低いほど小さくなり、特に水温の影響を大きく受けるため、低い水温の緯度海域において α の変化が最も大きくなると説明でき、深度 2000[m] 以深では、各海域における $\Delta \alpha$ の差が小さくなるのがわかる。Fig.9 では、Fig.6-8 と異なり、500[m] 以深では、深度が大きいくほど $\Delta \alpha$ が小さくなる傾向がある。これは、1000[Hz] では、ホウ酸の緩和作用だけではなく $MgSO_4$ の緩和作用の影響も受けはじめていと説明できる。Fig.10 の 3.5[kHz] では、Fig.5-8 の傾向と全く逆になり、高緯度海域の方が、 $\Delta \alpha$ が小さくなっている。これは、周波数が上がると、 $MgSO_4$ の緩和作用の項の影響が支配的になり、式 1) における A_1 の pH の影響よりも A_2 の塩分濃度 S の影響が大きくなるためであると考えられる。

4.2 音響周波数と $\Delta\alpha$ の関係

Fig.11 に、それぞれの緯度における周波数と $\Delta\alpha$ との関係を示した。

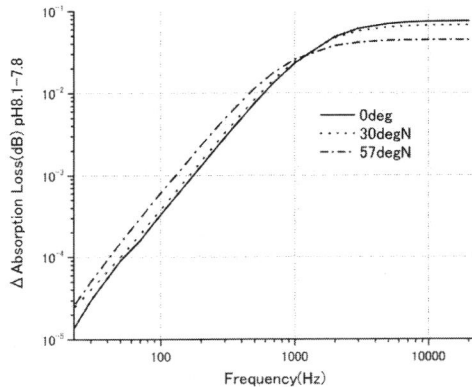


Fig. 11 各緯度における周波数と吸収損失との関係(深度 200m)

この図からわかるように、高緯度海域における $\Delta\alpha$ は、ほぼ 1.5 [kHz]よりも高い周波数において逆転し、他の海域よりも小さくなるが見て取れる。

5. 伝搬損失の見積もり

吸収損失 α を基に実際に長距離の音波伝搬における伝搬損失 TL の値を見積もった。各周波数と pH の違いによる ΔTL の関係を Table.1 に示す。この表において概ね実用的と思われる伝搬距離の値を使っている。

この表からわかるように 400[Hz]における ΔTL が最も大きく、将来の海洋音響トモグラフィ観測においては、S/N の見積りに考慮が必要になる可能性がある。一見すると 22[Hz]や 100[Hz]での伝搬損失の差異はさほど大きな値でないように見える。しかし、例えば差異が、僅かであっても、周囲環境雑音の増加は、充分考えられる。しかも、海洋の音響場の変化が僅か数十年という短い期間で地球規模で生じることは、鯨など音響コミュニケーションを利用する海洋哺乳動物に対しての影響は全く不明であり、大きな懸念を生じさせる。

6. まとめ

我々は、海水中の酸性化に起因するとされる低周波音波の吸収損失の変化を調査し、実際の CTD データを使って吸収損失の差異を計算した。その結果、今世紀末までに吸収損失は小さくなり、長距離音波伝搬に影響を与える可能性があることが示唆された。また、浅海域においては、高緯度海域での損失が大きくなることが示さ

れた。

周波数 [Hz]	伝搬距離 [km] 水深 200[m]		伝搬損失 TL (dB)		Δ TL [dB]
			pH=8.1	pH=7.8	
22	10000 (円筒拡散)	57	70.8	70.5	0.3
		30	70.5	70.3	0.2
		0	70.4	70.3	0.1
100	3000 (円筒拡散)	57	61.56	60.95	0.61
		30	60.98	60.60	0.38
		0	60.85	60.53	0.32
400	300 (円筒拡散)	57	61.01	58.62	2.39
		30	59.14	57.46	1.68
		0	58.67	57.16	1.51
1000	100 (円筒拡散)	57	57.25	54.66	2.45
		30	56.55	54.10	2.45
		0	56.20	53.87	2.33
3.5k	30 (球面拡散)	57	96.57	95.28	1.29
		30	96.29	94.51	1.78
		0	96.41	94.48	1.63

Table.1 伝搬損失の見積もり

参考文献

- 1) K.C. Hester, E.T. Peltzer, W.J. Kirkwood, P.G. Brewer, Geophys. Res. Lett., Vol.35, No.19, L19601, 2008
- 2) Tatiana Ilyana etc, Nature Geoscience Vol.3, pp18-22, 2010
- 3) Schulkin M & Marsh H.W., Journal of the Acoustical Society of America Vol.34, pp864-86, 1962
- 4) Francois R. E., Garrison G. R., JASA 72(3), 896-907, 1982
- 5) Francois R. E., Garrison G. R., JASA, 72(6), pp1879-1890, 1982.
- 6) Ainslie M. A., McColm J. G., JASA, 103(3), pp1671-1672, 1998
- 7) C-T. Chen and F.J. Millero, J. Acoust. Soc. Am. 62(5) pp1129, 1997.
- 8) Toshio Tsuchiya, Proceeding of Symposium on Ultrasonic Electronic, Vol.30, pp157-158, 2009
- 9) <http://www.jamstec.go.jp/cruisedata/mirai/j/index.html>
- 10) W. J. Richardson, C. R. Greene, Jr., C. I. Malme and D. H. Thomson, Marine Mammals and Noise, Academic Press, pp. 164. 1995,
- 11) 海洋音響学会編、海洋音響の基礎と応用、pp.28